



マイクロ波／ミリ波電圧制御発振器の低位相雑音化に関する研究

著者	津留 正臣
号	60
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5202号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00120533

氏 名	つ る まさ おみ
授 与 学 位	津 留 正 臣
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成28年3月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 通信工学専攻
指 導 教 員	マイクロ波/ミリ波電圧制御発振器の低位相雑音化に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 末松 憲治
	主査 東北大学教授 末松 憲治 東北大学教授 安達 文幸
	東北大学教授 陳 強 東北大学准教授 亀田 卓

論文内容要旨

マイクロ波/ミリ波といった高周波の電磁波を応用した代表的な分野として通信とレーダがあり、それぞれ通信方式やレーダ方式の高度化及び高周波回路の高性能化とともに発展してきた。その結果、通信においてはインターネットや携帯電話の普及が進展し、離れた人同士がいつでも、どこでも情報のやりとりを行えるようになった。近年では、スマートフォンやモバイル機器の普及により画像伝送が広まるなど、取り扱う情報量は爆発的に増大している。2020年に開催される東京オリンピックに向けて無線LANの整備が進み、さらにデータトラフィックの増大が想定される。また、レーダやセンサなどで得られた情報を無線通信により共有するなど、様々なものの間で情報のやりとりをする時代が到来しており、新たな変換点にある。このデータトラフィックの増大に応えるために多値変調技術における多値化や広帯域通信の開発がさらに進展すると考えられる。一方レーダにおいては、安全性向上を目的とした航空機管制や海上船舶の航海用レーダ及び自動車用レーダが開発されている。特に近年ではFM-CW方式によるミリ波車載レーダが普及し始めており、100m~200m程度離れた自動車等との衝突防止に用いられている。さらに、歩行者検知や自動運転を目的とした探知距離の近距離化が進展しており、レーダ装置の高分解能化が求められている。

これらの通信装置やレーダ装置の局発振源（局発源）にはマイクロ波/ミリ波電圧制御発振器（VCO）が用いられている。VCOの主要性能は、位相雑音と発振周波数可変範囲である。通信装置においては、多値化が進むと各シンボルの間隔が狭くなり、位相雑音の影響で生じる位相誤差のために正しいシンボルの判定が困難になってくる。また、広帯域通信が進展すると各チャネル帯域が広がり、利用する周波数範囲が広がる。そのため、VCOは発振周波数を大きく変化できる必要があり、発振周波数可変範囲の広帯域化が重要である。FM-CWレーダ装置においては、VCOの発振周波数を時間とともに連続的に変化（チャープ）させて送信し、受信した目標物からの反射波を周波数変換器でダウンコンバートして送信波との差分を検出することで距離と速度を算出する。探知距離が短くなると複数の目標物が近接して存在するため、これらを分離して検出するには高い距離分解能が求められる。近接した複数目標物の検出信号は重なりが大きくなり、信号対雑音比が劣化して、正しく検出できなくなるため、この検出信号の重なりを改善するにはVCOの位相雑音を低減することと、発振周波数可変範囲を広くすることが重要である。

以上のことから、通信装置やレーダ装置の今後の進展に伴い、局発源であるVCOにおいて位相雑音性能及び発振周波数可変範囲の広帯域性能の向上はさらに重要となる。本研究はマイクロ波/ミリ波VCOの低位相雑音化

及び周波数可変範囲の広帯域化を図り、上述のような通信装置及びレーダ装置の進展に寄与することを目的とする。

VCO は、能動素子、能動素子の各端子とグランドに接続されるリアクタンス回路（入力反射回路、直列帰還回路、出力反射回路）、及び能動素子の入力-出力端子間に並列に接続されるリアクタンス回路（並列帰還回路）とで構成される。VCO はこれらのリアクタンス回路によって能動素子に正帰還をかけることで発振する。発振周波数は可変容量素子などを用いて入力反射回路のリアクタンスを変化させることで掃引される。

ここで、発振周波数を考えなく変化させると VCO の Q 値も変化し、位相雑音の低下を招いてしまう。したがって、本研究ではマイクロ波/ミリ波 VCO の低位相雑音化かつ発振周波数可変範囲拡大のために、下記 2 つのアプローチに基づいた構成を提案する。

(1) 発振周波数の可変範囲を保持して Q 値を向上

(2) Q 値を保持して発振周波数の可変範囲を拡大

図 1 に、本論文の構成を示す。

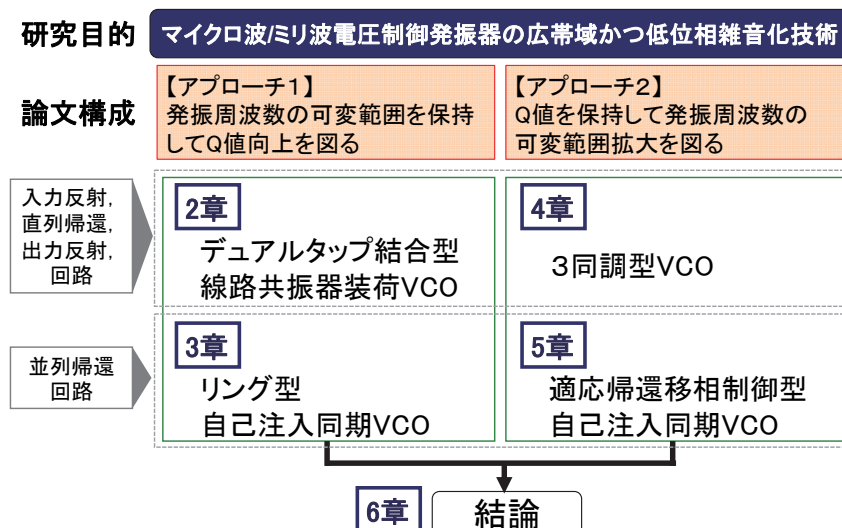


図 1 本論文の構成

発振周波数可変範囲を保持して Q 値を向上する第 1 のアプローチに基づいて、2 つの回路構成を提案する。1 つ目は、入力反射回路の高 Q 化を図ったデュアルタップ結合型線路共振器装荷 VCO である。図 2 に、デュアルタップ結合型線路共振器装荷 VCO の概略構成を示す。本 VCO は従来よりも共振器線路長を長くすることで位相の傾きを大きくして Q 値の向上を図るとともに、その共振器の非終端点に可変共振回路を接続することで発振周波数可変範囲が保たれる回路構成である。また、 Q 値と発振周波数可変範囲とを独立に設計が可能である。X 帯において本提案の共振器を装荷した VCO を試作し、実験により世界トップレベルの位相雑音 -114.4dBc/Hz 以下@100kHz 離調を達成した。2 つ目は、並列帰還回路により高 Q 化を図ったリング型自己注入同期 VCO である。図 3 に、リング型自己注入同期 VCO の概略構成を示す。本 VCO は、能動素子、入力反射回路、直列帰還回路、及び出力反射回路で構成される被同期 VCO の並列帰還回路に、被同期 VCO と同じ構成の VCO を用いる。これにより、提案するリング型自己注入同期 VCO の位相の傾きは被同期 VCO の 2 倍となり、小型なサイズで Q 値を 2 倍に向上することが可能となる。また、被同期 VCO と並列帰還回路の VCO の同調電圧を同時に制御することで被同期 VCO の発振周波数可変範囲は狭くならず保たれる。K 帯において本提案の VCO IC を試作し、実験により発振周波数可変範囲を保持して 6dB の低位相雑音化が達成されることを確認した。

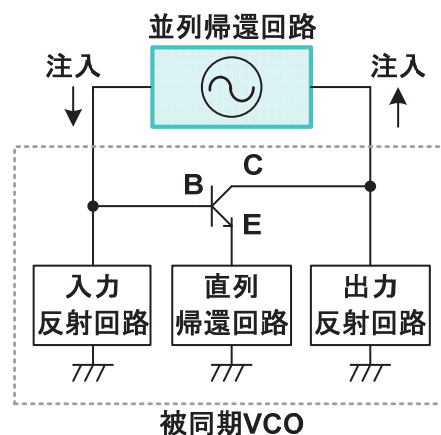
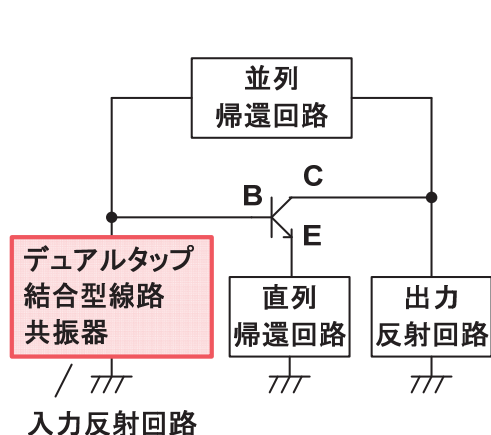


図2 デュアルタップ結合型線路共振器装荷 VCO の概略構成 図3 リング型自己注入同期 VCO の概略構成

Q 値を保持して発振周波数可変範囲を拡大する第 2 のアプローチに基づいて、2 つの回路構成を提案する。1 つ目は、3 つのリアクタンスを同時に変化させる 3 同調型 VCO である。図 4 に、3 同調型 VCO の概略構成を示す。従来、入力反射回路と直列帰還回路の 2 つのリアクタンスを同時に変化させることで広い発振周波数可変範囲を得ていたが、本 VCO はさらに出力反射回路も同時に変化させる回路構成であり、 Q 値の変動を抑えて発振周波数可変範囲の拡大が可能となる。C-Ku 帯において本提案の VCO を試作し、実験により位相雑音-112dBc/Hz 以下@1MHz 離調で世界トップの発振周波数可変範囲 100%が得られることを確認した。2 つ目は、並列帰還回路に発振周波数の変化に応じて帰還移相を制御する回路を備えた適応帰還移相制御型自己注入同期 VCO である。図 5 に、適応帰還移相制御型自己注入同期 VCO の概略構成を示す。本 VCO は並列帰還回路に備えた長い伝送線路と位相検波出力電圧に基づいて制御される移相器とを備えた構成である。これにより、長い伝送線路による高い Q 値を保持して連続した発振周波数可変範囲の拡大を図ることが可能である。K 帯において本提案 VCO のコアとなる位相検波器装荷被同期 VCO IC を試作し、外部に同軸線路と移相器を接続した実験により低位相雑音を保持したまま連続した発振周波数可変範囲が約 40 倍拡大することを確認した。

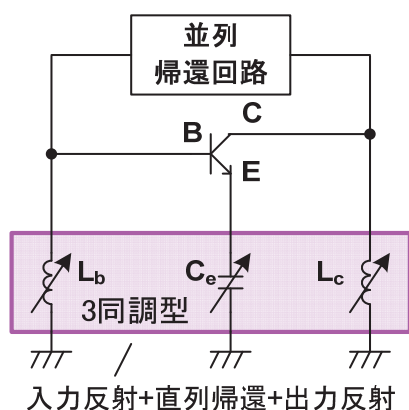


図4 3同調型 VCO の概略構成

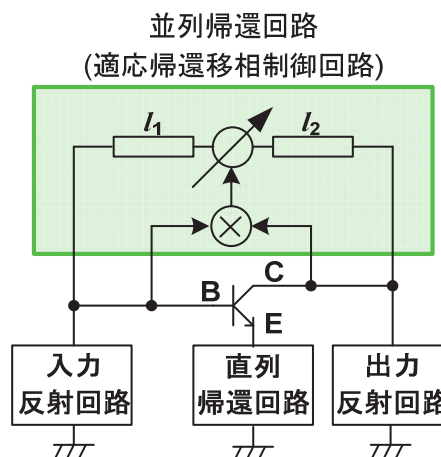


図5 適応帰還移相制御型自己注入同期 VCO の概略構成

図 6 に、位相雑音と発振周波数可変範囲の比帯域に関する従来文献との比較を示す。図 6(a)は、マイクロ波帯において開発したデュアルタップ結合型線路共振器装荷 VCO (第 2 章) と 3 同調型 VCO (第 4 章) に関するものである。マイクロ波帯 VCO はこれまでも多くの製品に用いられているため、位相雑音の評価は絶対値が重

要である。ただし、周波数に応じてトランジスタ性能が影響するため、試作した VCO の発振周波数 12GHz 帯近傍(9GHz~16GHz 帯)で比較を行っている。比較の結果、デュアルタップ結合型線路共振器装荷 VCO (第 2 章)は、衛星通信装置、及び車載レーダ装置(通倍して使用)向けに開発された従来の低位相雑音 VCO よりも低位相雑音化が図れており、通信の伝送容量及びレーダの検出精度の向上が期待される。3 同調型 VCO (第 4 章)は、通信装置、測定装置、及び電子戦装置向けに開発された従来の広帯域 VCO よりも広い発振周波数可変範囲が得られており、さらに広帯域化が進む通信装置への適用だけでなく、1 つの VCO で複数の通信方式への適用や、広い周波数帯をカバーするのに必要な VCO の数の削減などにより様々な装置の小型・低コスト化が期待される。

図 6(b)は、ミリ波帯において開発したリング型自己注入同期 VCO (第 3 章)と適応帰還移相制御型自己注入同期 VCO (第 5 章)に関するものである。ミリ波帯 VCO は現在活発に開発が行われており日進月歩の状態にあるため、位相雑音は改善量で評価を行っている。比較の結果、リング型自己注入同期 VCO (第 3 章)、適応帰還移相制御型自己注入同期 VCO (第 5 章)ともに、従来の自己注入同期法や低位相雑音化を図ったその他の既発表文献(テール電流制御、反射と通過によるループを備えた 2 重ループ、アクティブフィルタ、AM-PM 変換抑圧、スリットグラウンド構造の適用)と同等の位相雑音改善量を得つつ、衛星通信装置及び車載レーダ装置に適用可能な発振周波数可変範囲が得られている。また、バラクタダイオードの電極レイアウトの変更、容量結合、PM-AM 変換により低位相雑音化を図った既発表文献に対しては比帯域が同等でより大きな位相雑音改善量が得られている。リング型自己注入同期 VCO (第 3 章)の位相雑音改善量は適応帰還移相制御型自己注入同期 VCO (第 5 章)に比べて小さいが、非常に小型であるメリットがある。また、第 3 章、第 5 章ともに 30GHz 帯で約 -100dBc/Hz@1MHz 離調の性能である。

したがって、マイクロ波帯においてはトップレベルの低位相雑音性能(低位相雑音かつ広帯域)を達成し、実用化を図った。ミリ波帯においては 16QAM の 60GHz 帯無線通信に適用可能な位相雑音を得た。また、79GHz 帯近距離レーダに対しては 79GHz 帯で -95dBc/Hz 以下@1MHz 離調が必要であり、単一 VCO において 4dB 以上の改善を図ることで適用可能な位相雑音が得られると考えられる。以上により、2 つのアプローチ(周波数可変範囲を保持して Q 値を向上、Q 値を保持して周波数可変範囲を拡大)に基づいて低位相雑音化並びに低位相雑音発振器の広帯域化を実現する新たな回路構成を考案・実証し、その有効性を確認した。

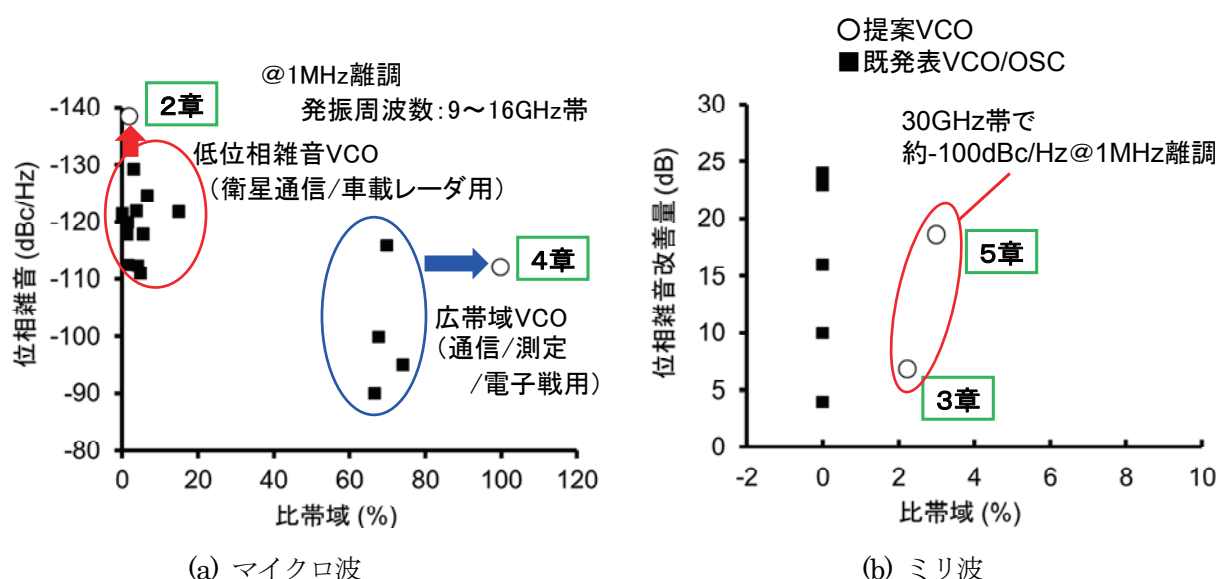


図 6 位相雑音と発振周波数可変範囲の比帯域に関する従来文献との比較

論文審査結果の要旨

近年の携帯端末の普及に伴う無線通信のデータトラフィックの増大や、安全性向上を目的に普及しつつあるミリ波車載レーダの高分解能化に対して、これらの装置の局部発振源となるマイクロ波／ミリ波電圧制御発振器（VCO）には低位相雑音化が求められている。本論文は、(1) 発振周波数の可変範囲を保ちつつ Q 値を向上する、(2) Q 値を保ちつつ発振周波数の可変範囲を拡大するという 2 つのアプローチに基づいて、広帯域かつ低位相雑音な VCO の新たな回路構成を提案し、その設計法を含む成果をまとめたものであり、全編 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、入力側帰還回路により発振周波数を制御する VCO に関して(1)のアプローチを適用し、デュアルタップ結合型線路共振器装荷 VCO を提案している。さらに、この共振器線路長の設計式を導出し、周波数可変範囲と位相雑音との関係を明らかにした。12 GHz 帯において本 VCO を試作し、比帯域 1.9 %の周波数可変範囲で世界トップの-114.4 dBc/Hz 以下@100 kHz 離調の位相雑音を達成している。この技術は、衛星通信機器の低位相雑音化に寄与しており、極めて有用な成果である。

第 3 章では、並列帰還回路により位相雑音を低減する VCO に関して(1)のアプローチを適用し、リング型自己注入同期 VCO を提案している。2 つの同種の VCO をリング型に接続し、帰還をかけることにより、 Q 値が 2 倍となることを明らかにした。30 GHz 帯において本 VCO IC を試作し、比帯域 2 %の周波数可変範囲で-107 dBc/Hz 以下

@2 MHz 離調の位相雑音を実現し、従来の自己注入同期 VCO に比べて約 6 dB の低位相雑音化を達成している。この技術は、共振器の高 Q 化が難しいミリ波帯 VCO IC の低位相雑音化に寄与する重要な成果である。

第 4 章では、反射回路と帰還回路の両者により周波数を制御する広帯域 VCO に関して(2)のアプローチを適用し、更なる広帯域な特性を実現することができる 3 同調型 VCO を提案している。従来の入力反射回路、直列帰還回路に加えて、出力反射回路のリアクタンスを可変とすることにより、高い Q 値を保ったまま可変範囲を拡大することができる。12 GHz 帯において本 VCO を試作し、比帯域 100 %の周波数可変範囲で-112 dBc/Hz 以下@1 MHz 離調の位相雑音を達成している。この周波数帯における周波数可変範囲としては世界トップレベルであり、極めて有用な成果である。

第 5 章では、並列帰還回路により位相雑音を低減する VCO に関して(2)のアプローチを適用し、発振周波数の連続可変範囲を拡大することができる適応帰還移相制御型自己注入同期 VCO を提案している。並列帰還回路に移相器を挿入し、発振周波数に応じて移相制御することで、高い Q 値を保ったまま発振周波数の連続可変範囲を拡大することができる。30 GHz 帯において本 VCO を試作し、比帯域 3 %の周波数連続可変範囲で-100.5 dBc/Hz 以下@1 MHz 離調の位相雑音を達成している。従来の自己注入同期 VCO に比べて周波数連続可変範囲を約 40 倍に拡大することができる。この技術は、ミリ波車載レーダなどの周波数連続可変 VCO を実現する上で極めて重要な成果である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、無線通信装置やレーダ装置の局部発振源として用いられる VCO の広帯域かつ低位相雑音な特性の実現に向けて、新たな回路構成と設計法を提案し、VCO の試作によりその有効性を実証するとともに、その実用化への展開に寄与したものであり、通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。